

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

КАЛАБАНОВ Сергей Александрович

**ДИСКРЕТНЫЙ КВАЗИТОМОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ РАДИАНТОВ МЕТЕОРНЫХ
ПОТОКОВ ПО ДАННЫМ ОДНОПОЗИЦИОННОГО РАДАРА С
УГЛОМЕРОМ**

Специальность: 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и
устройства радионавигации, радиолокации и телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико – математических наук

Казань – 2004

Работа выполнена в Казанском государственном университете

Научный руководитель

доктор физ.-мат. наук,
профессор Сидоров В.В.

Официальные оппоненты

доктор тех. наук,
профессор Седельников Ю.Е.

кандидат физ.-мат. наук,
доцент Хузяшев Р.Г.

Ведущая организация

ФГУП «Казанский научно-
исследовательский институт
радиоэлектроники»

Защита состоится « 23 » декабря 2004 г. в 14 ч. 30 мин. в аудитории 210 на заседании диссертационного совета Д212.081.18 по специальности 05.12.04 – радиотехника в Казанском государственном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан « 22 » ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д. физ.-мат. наук

Карпов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Радиолокационные исследования метеорных явлений – один из способов познания околоземного метеорного комплекса. Радарные наблюдения метеорных явлений имеют большое преимущество перед другими методами наблюдения метеоров в связи с тем, что они могут производиться в любое время суток, независимо от погоды и при этом позволяют получать большое число метеорных регистраций, что важно для обеспечения достоверных результатов. Кроме того, радарные способы измерения позволяют изучать метеорные частицы в диапазоне масс отличным от диапазонов, регистрируемых оптическими методами с Земли и прямыми измерениями пылевой метеорной составляющей со спутников. Известны два подхода в организации измерения падающего потока метеоров по радиометеорным данным. Одно из них основано на определении индивидуальных траекторий метеорных частиц и признано сейчас центральным методом благодаря свойству однозначности при вычислении координат радиантов метеоров. Второе направление, основанное на регистрации большого количества метеорных частиц, является статистическим методом. Первые наблюдения статистическим методом в Казанском университете были организованы Костылевым К.В. Этапным достижением на этом пути были, полученные Пупышевым Ю.А., карты распределений спорадических метеоров на любую половину месяца года. На основе этих карт с некоторыми предположениями о распределении скоростей метеоров был построен Государственный Общесоюзный Стандарт модели пространственного распределения метеорного вещества. Достигнутый Пупышевым Ю.А. результат сыграл большую научную роль в развитии, как астрономических работ, так и прикладных исследований, связанных с прогнозированием распространения радиоволн, которые были выполнены в Казанском университете. Однако в то время еще не были использованы угломерные характеристики радиоотражений. Следующим шагом в развитии метода явился квазитомографический подход, в котором уже учитывались угломерные данные. В результате было получено разрешение в распределении радиантов метеоров с точностью 10×10 градусов. Такая точность уже сопоставима с точностью большинства радарных измерений, основанных на определении индивидуальных

орбит. Этот метод позволил также увеличить точность прогнозирования метеорного распространения радиоволн. Однако, для астрономической интерпретации в этом решении не хватало измерительных данных о скоростях метеоров. Попытка исправить это положение была сделана в кандидатской диссертации Рассима Амира Али. На основе использования функции апостериорной вероятности он получил распределение скоростей метеоров по небесной сфере, которое, однако, не решало в полной мере проблему астрономической интерпретации наблюдаемых данных ввиду малой разрешающей способности в определении координат радиантов метеоров. К этому времени общее направление развития метеорных исследований в мире, связанное с поиском корреляции между кометами и порождаемыми ими метеорными потоками, потребовало более высокой точности измерения координат радиантов метеоров. Данные измерений индивидуальных траекторий, хотя и лежат в основе большинства работ в этом направлении, но также требуют увеличения точности. В связи с вышеизложенным, актуальными являются задачи повышения точности определения распределения координат радиантов метеоров по небесной сфере и введения в это распределение скорости метеора, как одного из аргументов многомерного распределения. Возможность увеличения разрешающей способности определения координат радиантов метеорных потоков представлялась достижимой, поскольку опиралась на реальные характеристики Казанского метеорного радара, т.к. точность определения углов прихода отраженного радиосигнала была лучше 1° . Успех в этом направлении мог быть достигнут за счёт дальнейшего развития квазиномографического подхода. В случае успешного решения задачи можно было ожидать, по предварительным оценкам, пятикратного увеличения линейного углового разрешения и использование данных о скоростях метеоров для каждого элемента углового разрешения. В определённом смысле такой подход позволил бы получить такие точности многомерных распределений координат радиантов и скоростей, которые обеспечивали бы возможность оценивать параметры элементов орбит метеорных потоков. Учитывая применимость разработанного подхода к данным радарных наблюдений, выполненных в Казанском университете за 12 лет почти непрерывных круглосуточных наблюдений, можно надеяться на то, что разработанный подход и блок вычислительных процедур позволят

резко увеличить астрономическую ценность накопленных в КГУ экспериментальных данных. Кроме того, однопозиционный вариант построения метеорного радара является наиболее распространённым в мире вариантом и экономически выгодным. На сегодняшний день известно более десяти метеорных радаров такого типа, с помощью которых накоплено огромное количество метеорных угломерных данных. К части этих результатов также можно применить разработанный подход и получить важные для метеорной астрономии данные о метеорном комплексе в окрестности орбиты Земли и закономерностях его эволюции.

Целью диссертационной работы является увеличение разрешающей способности определения координат радиантов метеорных потоков однопозиционным метеорным радаром на основе использования нового дискретного квазитомографического метода и блока компьютерных программ обработки угломерной информации и данных о скоростях метеоров.

Для выполнения поставленной цели необходимо:

- Разработать методику и алгоритм определения координат радиантов метеорного потока по данным метеорного радиолокатора.
- С помощью компьютерной модели метеорных регистраций оценить работоспособность и эффективность разработанной метода и обосновать выбор основных параметров квазитомографического подхода.
- Разработать и реализовать программное обеспечение по обработке данных метеорных радиоотражений с формированием банка данных распределения по координатам и скоростям наблюдаемых метеорных скоплений.

Методы исследования. Идентификация результатов радиолокационных измерений производилась на основе использования идеи радионавигации, принципа томографии и математического моделирования. Для устранения системного шума возникающего при радионавигационном подходе был применён принцип взаимной корреляции независимых измерений.

Научная новизна полученных результатов включает следующее:

1. Впервые реализован подход, существенно повышающий разрешающую способность однопозиционного метеорного радара для определения координат радиантов метеорных потоков малой интенсивности на основе объединения идей радионавигации и томографии.
2. Впервые разработан метод и компьютерные программы, позволяющие получать распределение координат радиантов метеорных потоков с высоким (2×2 градуса) разрешением, которые вместе с данными о скоростях метеоров достаточны для определения параметров средних орбит для каждого элемента разрешения.
3. Введено понятия «микропоток», как обнаруживаемый радаром метеорный поток минимальной интенсивности. Показано, что микропоток может быть физической реальностью, как совокупность метеорных событий со свойствами метеорных потоков.
4. На основе экспериментальных данных метеорного радара КГУ для разных лет наблюдений впервые получены карты распределения координат радиантов метеорных потоков по небесной сфере с угловым разрешением 2×2 градуса и с применением скоростного интервала $\Delta V = 3$ км/сек.
5. Получены новые данные о тонкой угловой структуре радиантов некоторых основных метеорных потоков, наблюдаемых на северной небесной полусфере.

Достоверность полученных результатов определяется:

1. Совпадением распределения координат радиантов, полученных для мощных ежегодных метеорных потоков с уже имеющимися данными, взятыми из независимых и проверенных источников.
2. Проверкой работоспособности и эффективности разработанной методики на основе моделирования метеорных регистраций.
3. Использованием экспериментальных угломерных данных, полученных с помощью Казанского метеорного радара и неоднократно проверенных при решении других научных задач.
4. Согласованностью полученных распределений с характерными для метеорных явлений закономерностями, обусловленными распределением скоростей метеоров и различной замечаемости

метеоров в зависимости от положения их радиантов на небесной сфере.

Практическая значимость работы определяется тем, что:

1. Создан метод определения координат радиантов метеоров на небесной сфере с более высоким угловым разрешением на основе данных измерений угломерных координат и скоростей метеоров для однопозиционного метеорного радар.
2. Полученные результаты имеют астрономическую ценность, т.к. высокоточные данные о координатах радиантов с использованием данных о скоростях метеоров способствуют увеличению знаний о метеорном комплексе вблизи орбиты Земли, а также необходимы для углубления представлений о закономерностях эволюции пылевой составляющей Солнечной системы.
3. Карты распределения координат радиантов и скоростей микропотоков могут быть использованы для прогнозирования условий метеорного распространения радиоволн, а также для прогноза метеорной опасности при космических полетах.

На защиту выносятся:

1. Дискретный квазитомографический метод и алгоритм обработки данных метеорного радара.
2. Реализация компьютерных программ с использованием разработанного алгоритма.
3. Имитационная модель метеорных регистраций и анализ на её основе эффективности предложенного дискретного квазитомографического метода.
4. Карты распределения радиантов метеоров по небесной сфере за 6 месяцев для разных лет наблюдений, полученные при обработке экспериментальных данных метеорного радара КГУ разработанным методом.
5. Исследование тонкой структуры некоторых метеорных потоков на основе новых возможностей высокого разрешения, предоставляемых дискретным квазитомографическим методом обработки экспериментальных данных метеорного радара.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы докладывались на ежегодных итоговых научных конференциях Казанского государственного университета, а также на Всероссийских и международных научных конференциях. Лично автором доклады по

этой тематике были представлены на международной конференции «Meteoroids-2001» (Кируна, Швеция, 2001), на международной конференции «АСМ-2002» (Берлин, Германия, 2002), на 25-й Генеральной ассамблее Астрономического Союза IAU-2003 (Сидней, Австралия, 2003), на объединённой международной научной конференции «Новая Геометрия Природы» (Казань, Россия, 2003), на международной конференции «Meteoroids-2004» (Лондон, Канада, 2004). Материал был представлен на XX Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн (Нижний Новгород, 2002), на Всероссийской астрономической конференции ВАК-2004 «Горизонты Вселенной» (Москва, 2004).

Работа по этому направлению была неоднократно поддержана фондом РФФИ. В проекте РФФИ №00-02-16845 автор принимал активное участие в исследованиях в качестве исполнителя. В проектах РФФИ №01-02-26991, №02-02-26995, №03-02-26789, №04-02-26798 автор работы являлся научным руководителем.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 научных статей. Среди них опубликована 3 статьи [7,13,14] в центральных рецензируемых изданиях; 6 статей в изданиях конференций [2,3,5,6,8,9]; 4 статьи в виде абстрактов [4, 10, 11, 12]; 1 статья в кафедральном сборнике [1].

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы. Данная работа содержит 121 страницу машинописного текста, 43 рисунка, 3 таблицы. Библиография включает 91 наименование.

Личный вклад автора. Идея квазитомографического подхода и общее направление работы были предложены научным руководителем. Разработка алгоритма метода, реализация блока компьютерных программ и анализ полученных результатов были выполнены лично автором.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность повышения угловой разрешающей способности при определении координат радиантов метеорного потока. Представлена цель диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость. Формулируются положения, выносимые на защиту, достоверность

полученных результатов. Представлены варианты апробации выполненной работы.

В первой главе приводится описание принципов радиотехнических методов изучения метеорных явлений в околоземном пространстве с помощью радиолокационных установок. Изложены два основных радиотехнических подхода к изучению метеорных явлений в атмосфере Земли. Первый статистический подход опирается на регистрации метеорных следов однопозиционным радаром, второй подход использует трёхпозиционный принцип измерения индивидуальных орбит метеоров (применение двух вынесенных пунктов). Дано краткое описание и технические характеристики автоматизированного метеорного радара КГУ-М5 с угломерной системой и канадского метеорного комплекса CMOR с двумя вынесенными пунктами.

Дано описание радиотехнических методов измерения скоростей метеоров, а именно: дальностно-временной метод, основанный на аппроксимации сигнала, отраженного от головы метеора, кривой второго порядка (гипербола); амплитудно-временной метод или дифракционный, основанный на регистрации быстрых изменений амплитуды отраженного сигнала, вызванных изменением фазы принимаемого радиосигнала при движении метеора перпендикулярно лучу.

Во второй главе обосновывается выбор решения поставленной задачи на основе томографического подхода. Такой способ решения предполагает изучение внутренней структуры объекта посредством проекций слоя объекта на известную плоскость. В рассматриваемом случае метеорное отражение дает проекцию на небесную сферу в виде линии возможного положения радианта. Выбранный способ решения поставленной задачи является, по сути, развитием статистических квазитомографических методов, ранее разработанных в КГУ. Развитие представляемого метода пошло по пути увеличения угловой разрешающей способности за счет разбиения небесной сферы на элементарные ячейки 2×2 градуса, использования дополнительного параметра-скорости метеора и выбора интервала временного усреднения, равного 1 суткам. Выбранная дискретность данного метода была обоснована наличием двух основных факторов:

1. максимальная погрешность угломера метеорного радара КГУ составляет около 1° ;

2. используемая апексная эклиптическая система координат (ϵ , ψ) обеспечивает максимальную погрешность в измерении координат радиантов метеоров в пределах 1° за одни сутки наблюдений.

Выбор апексной эклиптической системы координат (ϵ , ψ) обосновывается тем, что в такой системе координат видимое положение радиантов метеоров на небесной сфере, принадлежащих одному и тому же потоку, не разрушается вследствие вращения Земли вокруг Солнца в случае, если метеорный поток представляет собой пучок орбит, расходящихся от Солнца. Различие орбит метеоров внутри потока будет осуществляться разницей дат наблюдений. В выбранной системе координат (ϵ , ψ) начало отсчета связано с апексом Земли, поэтому вся система вращается в процессе движения Земли вокруг Солнца. Ось ψ направлена на Солнце, значение угла ψ меняется в пределах $[0, 360]$; ось ϵ направлена по апексу, значение угла ϵ меняется в пределах $[0, 180]$.

В связи с измерением угла прихода отраженного радиосигнала в азимутальной системе координат, используется поэтапный переход к выбранной системе координат (ϵ , ψ). Такой переход осуществляется в три этапа:

1. Переход от азимутальной к экваториальной системе координат:
 $(A, z) \Rightarrow (\alpha, \delta);$
2. Переход от экваториальной к эклиптической системе координат:
 $(\alpha, \delta) \Rightarrow (\beta, \lambda);$
3. Переход от эклиптической к апексной системе координат:
 $(\beta, \lambda) \Rightarrow (\epsilon, \psi).$

Такой поэтапный переход к выбранной системе координат (ϵ , ψ) осуществляется для каждой регистрации метеорного следа.

Показана разработанная методика по определению координат радиантов метеорных потоков при использовании угломерных данных и измеренных скоростей метеоров, полученных с помощью метеорного радара. Процесс определения координат радиантов метеоров предполагает нахождение точек пересечения, образованных попарным сочетанием линий возможного положения радианта на небесной сфере, полученных только от метеоров с измеренными скоростями. Линия положения радианта на небесной сфере представляет собой линию большого круга, образованную пересечением небесной сферы с плоскостью перпендикулярной к лучу

принятого радиоотражения. Пересечение таких окружностей предполагает наличие двух точек пересечения, одна из которых будет находиться выше горизонта, а другая ниже его. Геометрически они обе равнозначны, но физический смысл несет только точка пересечения, расположенная над горизонтом, в силу географического положения метеорной станции КГУ. Однако, точка пересечения линий положения, находящаяся над горизонтом, не будет однозначно определять координаты истинного радианта. Фактически возможны три варианта образования точки пресечения: а) оба отражения принадлежат метеорам одного метеорного потока, б) они принадлежат разным потокам (ложные радианты), в) они принадлежат спорадическому фону, т.е. имеют случайные радианты. Совокупность таких точек пересечения при сопоставлении каждого радиоотражения с каждым, с использованием только тех метеорных регистраций, у которых измерена скорость, создаёт несколько истинных радиантов метеорных потоков и множество случайных радиантов (системный шум) в пределах видимой области небесной сферы. Точность “попадания” истинных радиантов одного и того же потока в ограниченную область будет зависеть от ошибки измерения угломера радара. Становится очевидной проблема отличить истинные радианты от ложных. Решение данной задачи найдено в применении порогового взаимно корреляционного отбора радиантов метеоров в одноимённых ячейках при сопоставлении независимых экспериментов. Решение такой задачи оказалось возможным при условии «редкости» событий системного шума, который зависит от оптимального соотношения между общим числом регистраций метеоров N_{max} , используемых в одном цикле решения, и общим количеством дискретных ячеек P . Суть решения данной задачи заключается в следующем. Распределение числа точек пересечений линий положений для двух групп независимых измерений N и M по выбранным дискретным интервалам (ε_j, ψ_k) можно записать как:

$$P_N(\varepsilon_j \psi_k) = P_N^0(\varepsilon_j \psi_k) + P_N^R(\varepsilon_j \psi_k)$$

$$P_M(\varepsilon_j \psi_k) = P_M^0(\varepsilon_j \psi_k) + P_M^R(\varepsilon_j \psi_k)$$

Здесь P^0 - распределение истинных радиантов потоков,
 P^R - распределение случайных, ложных радиантов.

Если N и M группы будут достаточно большими, то можно полагать, что одноименные участки (ε_j, ψ_k) обеих групп, в которых

располагаются истинные радианты, будут непустыми. В то же самое время распределения случайных радиантов P^R обеих групп будут не коррелированы и будут совпадать только случайно, если события появления ложных радиантов можно считать событиями достаточно редкими. Требование редкого появления ложных радиантов выдвигает ограничение на количество измерений в группах N и M .

Применение к группам N и M операции взаимной корреляции в одноименных непустых ячейках (ϵ_j, ψ_k) можно записать в символическом виде:

$$P_{M+N} = P_M \cap P_N = P_{M+N}^0 + P_{M \cap N}^R$$

Отсюда можно получить:

$$P_{M+N}^0 = P_M \cap P_N - P_{M \cap N}^R,$$

где P_{M+N}^0 - искомое распределение радиантов;

$P_{M \cap N}^R$ - распределение ложных радиантов.

Распределение $P_{M \cap N}^R$ зависит от способа разбиения данных на группы N и M , а также от общего количества регистраций N_{max} , одновременно поступающих на обработку квазитомографическим методом. Распределение P_{M+N}^0 при большой статистике меняться не должно. Допустим, что тот же набор данных разбивается другим способом на группы L и O . После операции взаимной корреляции данных этих двух групп можно получить соотношение:

$$P_{L+O} = P_L \cap P_O = P_{L+O}^0 + P_{L \cap O}^R.$$

После объединения результатов P_{M+N} и P_{L+O} имеем уравнение:

$$P_{M+N} \cap P_{L+O} = (P_{M+N}^0 \approx P_{L+O}^0) + P_{M \cap N}^R \cap P_{L \cap O}^R.$$

Отсюда видно, что в результате получаются те же истинные радианты и ещё раз уменьшенные по «И» ложные радианты.

Эффективность данного метода зависит от правильного выбора объема данных, используемых одновременно в одном цикле расчета. Этот выбор обосновывается в третьей главе диссертации.

Приведено описание разработанного программного обеспечения по реализации дискретного квазитомографического метода и блок-схемы программ, описан пользовательский интерфейс. Программный комплекс делится на три основные группы:

1. Программа «Радиант» является основным программным продуктом, результатом работы которой являются выделенные координаты радиантов потоков, представленные в файлах типа массив на каждый день обработки и для каждого скоростного интервала. Реализуемый

этой программой перебор каждого метеора с каждым приводит к тому, что выполнение программы требует большого количества машинного времени. Для обработки одних суток наблюдений требуется около 10 часов машинного времени использованием компьютера класса Р II-600.

2. Программа «Месяц» выполняет вспомогательную функцию. Результатом ее работы является объединение файлов, полученных с помощью первой программы, за месячный интервал времени наблюдений в одну общую карту распределения координат радиантов потоков по небесной сфере с вычисленными средними скоростями метеорных групп.

3. Программа «Карты», разработанная совместно с магистрантом второго года обучения Филиным И.В., визуально отображает на небесную сферу информацию, собранную программой «Месяц» и позволяет применить систему «фильтров» по четырем параметрам, приписываемым каждой метеорной группе (скорость, дата, координаты, численность), для анализа полученных данных.

Третья глава диссертации посвящена определению параметров метода, обеспечивающих необходимое соотношение между вероятностью выделения потока с пороговой интенсивностью и вероятностью обнаружения ложного радианта. Показано, что поток событий системного шума растет пропорционально числу сочетаний из N измерений по 2, где N - общее количество регистраций в выборке, одновременно участвующих в одном цикле решения. Такое число сочетаний можно записать согласно формуле:

$$C^2_{N=2} = N! / [2!(N-2)!].$$

Согласно статистической теории, вероятность выделения истинных радиантов должна увеличиваться с ростом числа измерений N . Ограничение численности выборки накладывает ограничение на допустимое отношение плотности выделяемого потока к плотности системного шума. В работе было принято условие, что вероятность обнаружения ложных радиантов составляет не более 5%. Готовый аналитический метод решения задачи со случайными потоковыми событиями, при которых плотность системного шума растет по мере роста числа измерений N не был найден. Поэтому в задачу было введено ограничивающее условие. Для надёжного выделения малоинтенсивного метеорного потока нужно потребовать, чтобы

плотность шума d_p была бы меньше плотности полезного сигнала. Такое условие можно записать в виде уравнения:

$$d_p = \frac{C_N^2}{P} \leq \frac{\lambda}{\alpha}, \quad (1)$$

где λ —пороговая плотность обнаруживаемого метеорного потока, α —отношение плотности обнаруживаемого потока к плотности системного шума, P —общее количество элементарных ячеек на небесной сфере. Необходимо найти оптимальное соотношение между значениями α и N . Для определения N при условии, что вероятность обнаружения ложных радиантов равна 5%, было применено имитационное моделирование. Затем определялось значение α из уравнения (1) при заданном количестве P элементарных ячеек и найденном значении N числа регистраций из модели. Имитационная модель строилась на основе использования части небесной сферы размером 40x40 элементарных ячеек. В пределах этой области генерировались потоковые и случайные радианты метеоров, к которым применялся описанный в главе 2 алгоритм выделения метеорных потоков. Зная значение величины α , при котором вероятность обнаружения ложных радиантов составляет не более 5%, осуществлялся пересчет общего числа регистраций N для северной небесной полусферы, где количество элементарных ячеек равно $P=90*90=8100$. В этом случае общее число регистраций, одновременно обрабатываемых дискретным квазитомографическим методом не должно превышать $N_{max}=83$. Предполагалось, что вероятность появления метеора подчинено пуассоновскому распределению. Было показано, что при пороге регистрации метеорного потока, равного 4 метеорам за сутки, для условия совпадения одноименных событий как минимум в двух из трёх независимых выборках, метеорный поток с пуассоновской плотностью равной 6 метеорам в сутки может быть обнаружен с вероятностью 83%. Эффективность разработанной методики продемонстрирована на двух рисунках. На рис.1 показано распределение апостериорной вероятности наблюдения одного метеорного потока на фоне спорадических метеоров. Здесь виден один максимум, образованный изначально заданным радиантом и множество других экстремумов, образованных ложными радиантами. На рис.2 при той же модельной ситуации входных данных, что и для рис.1, показан результат

дискретного квазитомографического решения. Видно, что получен только один изначально заданный радиант метеорного потока.

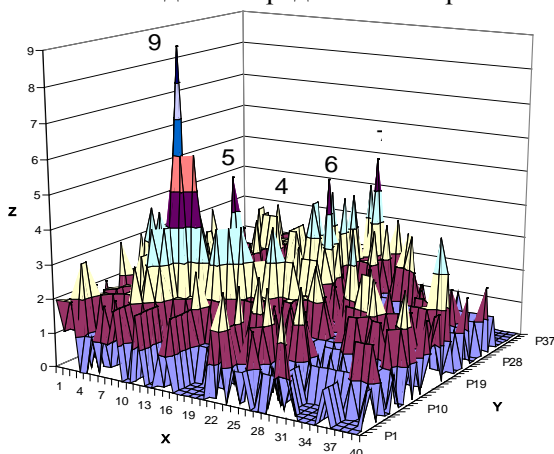


Рис. 1 Модельное распределение апостериорной вероятности обнаружения одного метеорного потока

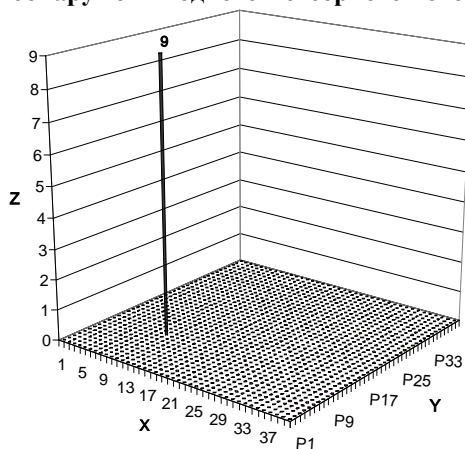


Рис.2 Результат дискретного квазитомографического решения, примененного к данным на рис.1

В четвертой главе диссертации даны результаты применения разработанного метода к экспериментальным данным метеорных наблюдений, выполненных на метеорном радаре КГУ. Получены

карты распределения координат радиантов метеорных потоков по небесной сфере для шести месяцев разных лет наблюдений (январь 1999 г., апрель 1989 г., июнь 1986 г., октябрь 1994 г., декабрь 1993 г., декабрь 1994 г.) Пример одной из карт приведён на рис. 3 для января 1999 года. Область радиации потока Квадрантид обведена окружностью.

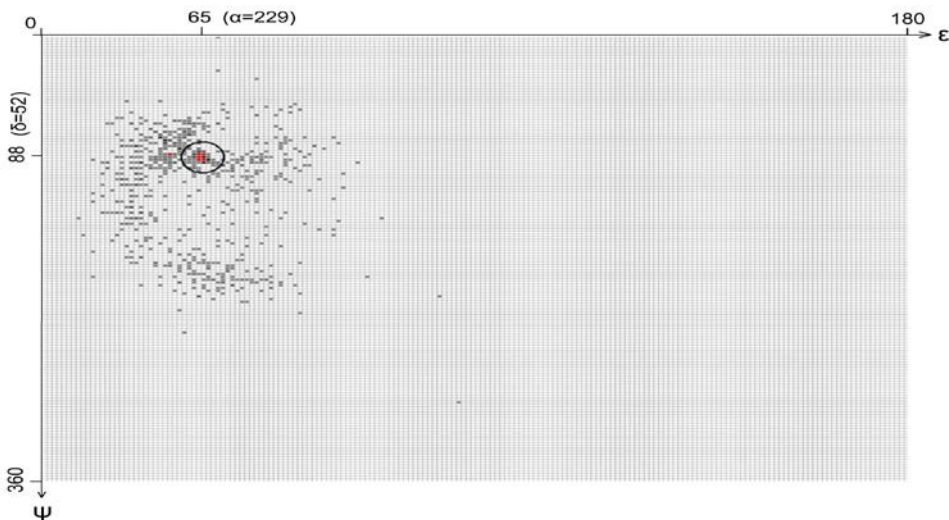


Рис. 3 Карта всей небесной сферы для января 1999 года.

Показано, что полученные распределения демонстрирует влияние наиболее мощных факторов избирательности метеорного радара, а именно: суточное вращение Земли (кольцевые структуры метеорных регистраций), годовое движение Земли вокруг Солнца (различия в структуре видимого распределения координат радиантов в зависимости от времени наблюдений) и фактор скоростной селекции радиолокационного способа наблюдения (уменьшение числа регистрируемых метеорных потоков в направлении к области антиапекса).

Показано, что такие карты распределения описывают как основные метеорные потоки (Квадрантиды, Апрельские Лириды, Дневные Ариетиды, Ориониды, Геминиды), так и малые метеорные потоки, например, малый поток в январе 1999 г.

Высокое угловое разрешение метода позволяет анализировать тонкую угловую структуру площади радиации метеорных потоков. Обнаружено, что метеорный поток Геминиды фактически состоит из двух пространственных ветвей. Определено, что в 1993 году первая ветвь была зарегистрирована в скоростном интервале $V_{cp.}=34$ км/с, с максимальной активностью 12 декабря; вторая ветвь – в скоростном интервале $V_{cp.}=41$ км/с, с максимальной активностью 13 декабря. Изменение нормированной интенсивности двух ветвей потока Геминиды для 1993 года показано на рис. 4.

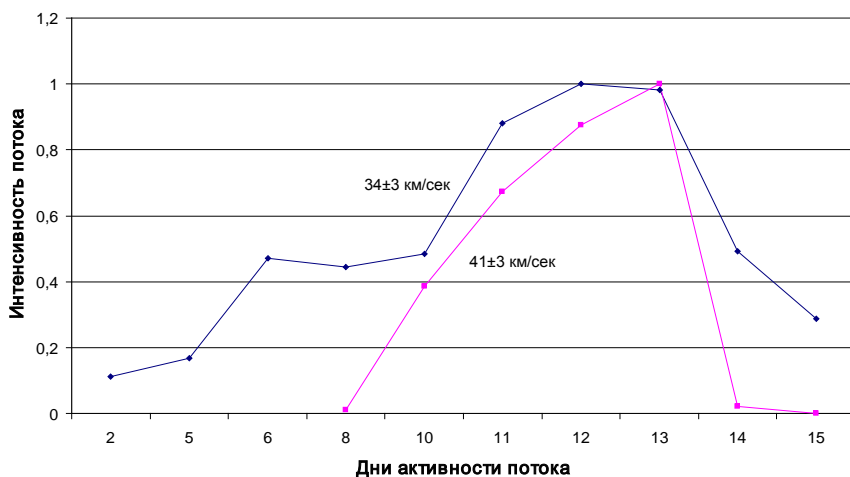


Рис. 4. Изменение активности потока Геминиды в 1993 г. в двух скоростных интервалах

Применение метода к хорошо известному потоку Геминиды показало, что разработанный алгоритм позволяет выделять слабые метеорные потоки, т.к. в начальной стадии своей активности поток Геминиды воспринимается как слабый метеорный поток. Показано, что на полученных картах метеорный поток Геминиды начинает проявлять себя с интенсивностью, равной 4 метеорам в сутки.

На всех месячных картах видно большое число малоинтенсивных метеорных потоков (до 1000 потоков за один месяц наблюдений). Такой факт дает основание считать, что разработанный

метод позволяет определять распределение координат радиантов метеорных потоков во всем спектре интенсивности от самых крупных до неоднородностей спорадического фона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены идеи и реализация нового метода изучения метеорного вещества в Солнечной системе по данным однопозиционного метеорного радара. Метод назван дискретным квазитомографическим по аналогии с классической томографией, в которой информация о внутренней структуре объекта извлекается из совокупности проекций коррелированных элементов этой структуры. Дискретным он назван потому, что для анализа выбран дискретный элемент (2x2 градуса, одни сутки, заданный скоростной интервал 3 км/сек, минимальное количество метеоров 4 метеора в сутки), определяющий минимально регистрируемый поток. Для решения задачи квазитомографического анализа использованы идеи радионавигации, в которых искомые координаты находятся по пересечению линий положения. Для устранения случайных решений применен принцип внешнего дополнения–разделения экспериментального материала на независимые выборки и поиск их коррелированных элементов при сопоставлении результатов, полученных по этим выборкам.

В данной работе были получены следующие выводы:

1. Разработанный метод позволил увеличить угловую разрешающую способность в определении координат радиантов метеорных потоков в 5 раз по сравнению с известными радиолокационными методами, а также использовать индивидуальные скорости метеоров для решения задачи увеличения углового разрешения.
2. Установлено, что понятие микропотоков, введенное изначально как дискретный элемент разрешения радара к радиантам метеорных потоков, является физической реальностью, описывающей как структуру крупных потоков, так и неоднородности спорадического фона.
3. Разработанный дискретный квазитомографический метод применен к имеющимся в базе данных КГУ угломерным данным метеорного радара. Получены карты распределения микропотоков по небесной сфере для 6 месяцев из разных лет наблюдений.

4. Обнаружено, что полученное распределение демонстрирует влияние наиболее мощных факторов избирательности метеорного радар, а именно: суточное вращение Земли, годовое движение Земли вокруг Солнца и фактор скоростной селекции радиолокационного способа наблюдения.
5. Применение метода к метеорному потоку Геминиды позволило на основе новых возможностей углового разрешения получить доводы в пользу того, что этот поток фактически состоит из двух ветвей с разными скоростями, интенсивностями и разными датами активности. Первая ветвь в 1993 году имела среднюю скорость 34 км/сек, время действия с 2 по 15 декабря, максимум активности 12 декабря с интенсивностью 180 метеоров в сутки, координаты максимума активности $\alpha=112^\circ$, $\delta=34^\circ$. Вторая ветвь имела среднюю скорость 41 км/сек, время действия с 8 по 15 декабря, максимум активности 13 декабря с интенсивностью 104 метеора в сутки, координаты максимума активности $\alpha=116^\circ$, $\delta=35^\circ$. Радианты двух ветвей потока смещены друг относительно друга на 4 градуса по координате α . Сложная структура радианта обнаружена и в потоке Дневные Ариетиды.
6. Получены координаты радиантов и скоростей наиболее крупных периодических метеорных потоков, действующих в течение года, и определена их наблюдаемая активность. Для потока Квадрантид в 1999 году были определены следующие характеристики: $V_{cp.}=43$ км/с, максимум активности образовался 4 января с координатами $\alpha=229^\circ$, $\delta=52^\circ$. Для метеорного потока Апрельские Лириды в 1989 году были получены следующие данные: $V_{cp.}=41$ км/с, максимум активности был 22 апреля с координатами $\alpha=270^\circ$, $\delta=34^\circ$. Для метеорного потока Ориониды были получены следующие характеристики: $V_{cp.}=67$ км/с, максимум активности проявился 22 октября с координатами $\alpha=97^\circ$, $\delta=17^\circ$. Для метеорного потока Дневные Ариетиды были получены следующие данные: первая ветвь в 1986 г. имела $V_{cp.}=37$ км/с, максимум активности 7 июня, координаты максимума активности $\alpha=40^\circ$, $\delta=25^\circ$; вторая ветвь имела $V_{cp.}=41$ км/с, максимум активности 12 июня, координаты максимума активности $\alpha=43^\circ$, $\delta=26^\circ$.
7. Полученные результаты дают многомерное (α , δ , V , t) распределение координат радиантов и скоростей микропотоков, по которым можно судить как о потоковой, так и о спорадической

составляющей метеорного комплекса на основе радарных измерений. Эти распределения после учета аппаратурной и физической избирательности могут быть использованы астрономами для изучения структуры орбит метеоров и их генетической связи с кометами и астероидами, а также для оценок метеорной опасности в окрестности Земли.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сидоров В.В., Калабанов С.А. Компьютерное моделирование решения квазитомографической задачи определения распределения радиантов метеоров по небесной сфере. // Прием и обработка информации в сложных информационных системах. Изд-во КГУ, Вып.20, 2001, с.80-87.
2. Kalabanov S.A., Sidorov V.V., Filimonova T.K. Microswarm structure of a meteoric complex beyond an ecliptical plane // Proceedings of "Meteoroids 2001", 2001, ESA Publications, Netherlands, p. 617-620.
3. Sidorov V.V., Kalabanov S.A. The discrete solution of a quasi-thomography problem for construction of radiant distribution of meteors by results of radar goniometer measurements // Proceedings of "Meteoroids 2001", 2001, ESA Publications, Netherlands, p. 21-26.
4. Сидоров В.В., Косенков Ю.Н., Калабанов С.А., Гайнуллин Р.В., Кондратьев П. Проблемы создания астрономической основы и соответствующей базы данных для моделирования и прогнозирования условий работы систем метеорной связи // Тезисы доклада. Труды 20-й Всероссийской конференции по распространению радиоволн, 2002, Н. Новгород, издательство ТАЛАМ, с.497-498.
5. Kalabanov. S., Sidorov. V., Stepanov. A. Structure of area of radiation of Geminids meteor shower and its vicinities on celestial sphere. One or many showers? // Proceedings of "ACM-2002", 2002, ESA Publications, Netherlands, p. 165-168.
6. Sidorov V., Kalabanov S. Heterogeneity of sporadic meteor complex as the rich data for possible prediction of comets, asteroids and other bodies // Proceedings of "ACM-2002", 2002, ESA Publications, Netherlands, p. 149-152.

7. Сидоров В.В., Калабанов С.А. Метод решения задачи определения радиантов метеорных потоков по угломерным данным метеорного радара // *Астрономический Вестник*, №2, 2003, том 37, с.162-173.
8. Sidorov V., Kalabanov S. Microshower structure of meteor complex near the radiation area of quadrantids // *Proc. of joint inter. conf. "New geometry of nature"*, Vol 3, Kazan, 2003, p. 181-184.
9. Kalabanov S. Meteor showers by quasy-tomography method with radar data // *Proc. of joint. inter. conf. "New geometry of nature"*, Vol. 3, Kazan, 2003, p. 110-112
10. Сидоров В.В., Сидорова С.В., Калабанов С.А., Филимонова Т.К. Карта распределения плотности падающего потока спорадических метеоров по северной небесной полусфере // Тезисы доклада. Всероссийская астрон. конф-я ВАК-2004 - "Горизонты Вселенной".
11. Kalabanov S., Sidorov V., Filimonova T. Meteor showers in 1993 and 1998 on the goniometric data // *Abstract book of IAU-25th General assembly*, Australia, Sydney-2003, p. 254.
12. Kalabanov S., Sidorov V. Sporadic meteor microshowers: data and parameters, *Abstract book of IAU-25th General assembly*, Australia, Sydney-2003, p. 254.
13. Sidorov V., Kalabanov S., Sidorova S., Filin I., Filimonova T. Associations of meteor microshowers or as the Kazan radar "sees" radiants on northern celestial hemisphere // *Proceedings of Meteoroids-2004*, journal *Earth, Moon, Planets*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2005 (in press)
14. Sidorov V., Kalabanov S., Sidorova S., Filin I., Meisel D.D., Gerrard A.J. Microshower structure of the meteor complex // *Proceedings of Meteoroids-2004*, journal *Earth, Moon, Planets*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2005 (in press)

Заказ №15. Тираж 100 экз.
Копировальный центр «МЭЛТ»
г. Казань, ул. Университетская, 32
т. (8432) 50-96-44